

Лекция 3 Биполярные транзисторы

Биполярным транзистором называется полупроводниковый прибор, имеющий два взаимодействующих между собой p-n-перехода. Технология изготовления биполярных транзисторов может быть различной – сплавление, диффузия, эпитаксия, - что в значительной мере определяет характеристики прибора.

В зависимости от последовательности чередования областей с различным типом проводимости различают n-p-n-транзисторы и p-n-p-транзисторы. Упрощенное устройство плоскостного n-p-n-транзистора приведено на рис. 1.10а, его условное обозначение – на рис. 1.10 б, а схема замещения – на рис. 1.10 в. Аналогичные представления для p-n-p-транзистора приведены на рис. 1.10 г, д, е.

Средняя часть рассматриваемых структур называется базой- Б, одна крайняя область - коллектором- К (накопитель электронов), а другая – эмиттером - Э (источник электронов). В несимметричных структурах электрод базы располагается ближе к эмиттеру, а ширина базы зависит от частотного диапазона транзистора и с повышением частоты уменьшается. Полярность напряжений, приложенных к электродам транзистора, показана на рис. 1.10 в, д.

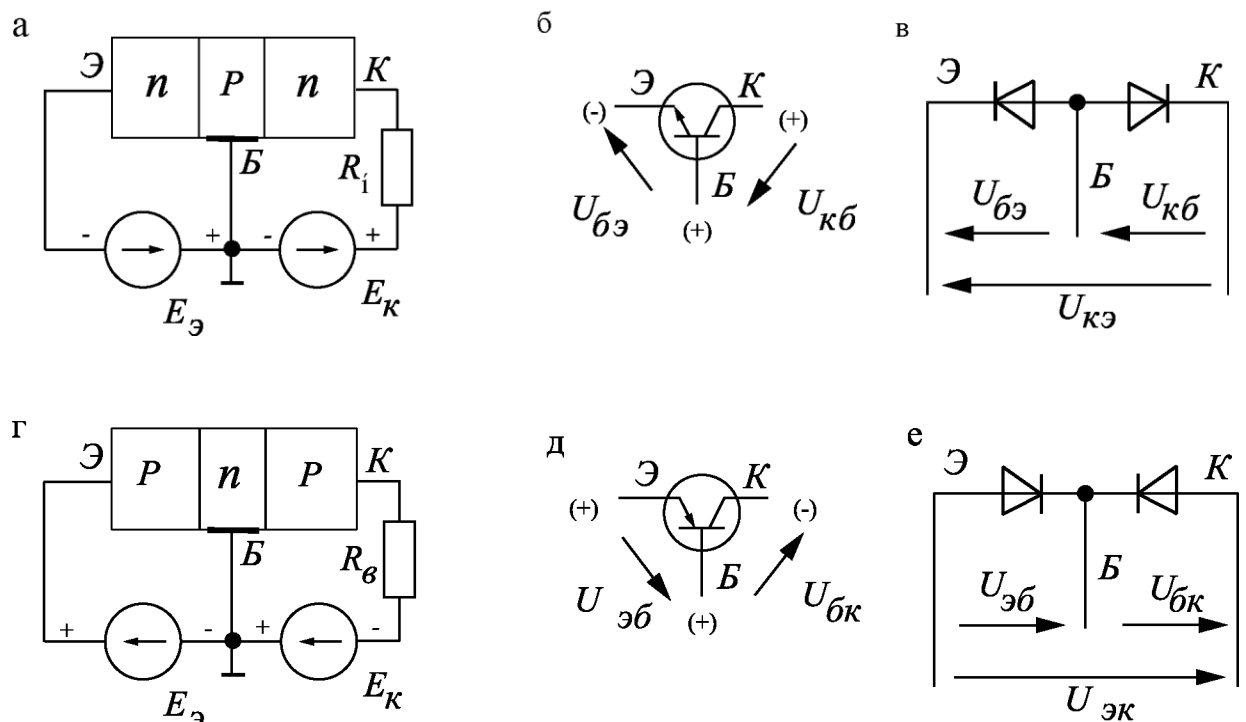


Рис.3.1. Устройство n-p-n-транзистора (а), его схематическое изображение (б) и схема замещения (в). Устройство p-n-p- транзистора (г), его схематическое изображение (д) и схема замещения (е)

В линейном режиме работы транзистора рис. 3.1 эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный – обратном. В режиме

насыщения оба перехода смещены в прямом направлении, а в режиме отсечки – в обратном.

Электронно-дырочный переход между эмиттером и базой называют **эмиттерным переходом**, а между коллектором и базой – **коллекторным**. На рис. 3.2 показаны структура транзистора, n-p-n-типа. Конструктивной особенностью биполярных транзисторов является то, что база выполнена слаболегированной, т.е. основных носителей зарядов в ней намного меньше чем в эмиттере и коллекторе.

Рассмотрим работу транзистора типа n-p-n. Между коллектором и базой приложено относительно высокое обратное напряжение $U_{КБ}$ (рис. 3.2). При отсутствии эмиттерного тока $I_Э$ небольшой обратный ток I_{K0} через закрытый коллекторный переход обусловлен движением только неосновных носителей заряда (для транзистора типа n-p-n коллектор). Ток I_{K0} не зависит от тока эмиттера, но существенно зависит от температуры и с ее повышением возрастает. Обратный коллекторный ток обычно составляет $10 \div 100$ мкА у германиевых и $0,1 \div 10$ мкА у кремниевых транзисторов.

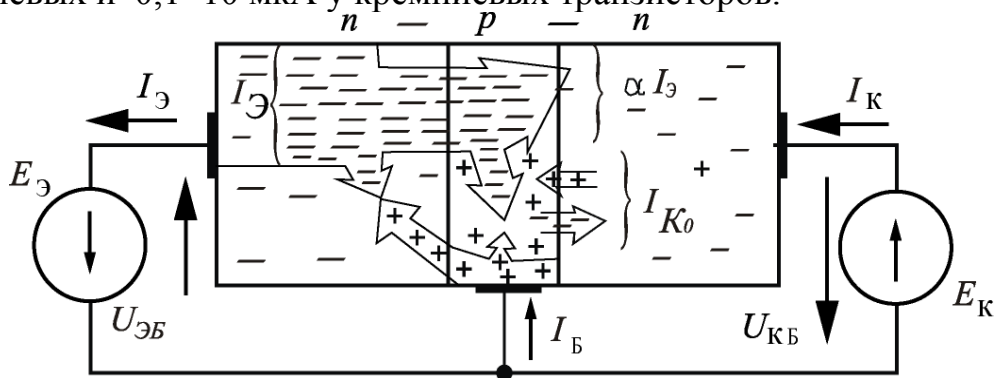


Рис. 3.2. Движение носителей заряда в транзисторе типа n-p-n

При подаче на переход база-эмиттер прямого напряжения $U_{ЭБ}$ от источника питания возникает эмиттерный ток $I_Э$, основные носители заряда – электроны преодолевают переход и попадают в базу. База выполнена из обедненного носителями заряда p-полупроводника и для нее электроны являются неосновными носителями заряда. Попавшие в область базы электроны частично рекомбинируют с дырками базы. Но поскольку толщина базы небольшая и концентрация дырок в базе низкая, рекомбинируют лишь немногие электроны, образуя базовый ток $I_Б$. Большинство же электронов, попав в ускоряющее электрическое поле вблизи коллекторного p-n-перехода, втягиваются в коллектор, свободно проходя через закрытый p-n-переход. Эта составляющая коллекторного тока мало зависит от напряжения на коллекторном p-n-переходе, т.е. при наличии электрического поля все электроны, за исключением рекомбинировавших, попадают в коллектор. Очевидно, что ток коллектора всегда меньше тока эмиттера на значение тока базы и практически равен току эмиттера.

Связь между приращениями эмиттерного и коллекторного токов характеризуется коэффициентом передачи тока

$$\alpha = \left. \frac{\partial I_K}{\partial I_{\mathcal{E}}} \right|_{U_{KB}=\text{const}} \approx \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_{\mathcal{E}}} \right|_{U_{KB}=\text{const}}$$

Для современных биполярных транзисторов $\alpha=0,9\div0,995$. При $I_{\mathcal{E}} \neq 0$ коллекторный ток транзистора

$$I_K \approx I_{K0} + I_{\mathcal{E}}$$

Таким образом, входным (управляющим) током является эмиттерный ток, а выходным – коллекторный.

Транзисторы р-п-р работают аналогично, только полярности внешних источников меняются на противоположные.

В зависимости от того, какой электрод транзистора используется в качестве общего вывода для входной и выходной цепей, различают три схемы включения транзистора: с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ) и с общим коллектором (ОК).

Рассмотренная на рис. 3.3 схема включения называется схемой с ОБ, на практике она используется редко. Наиболее распространенной является схема включения биполярного транзистора с общим эмиттером (рис. 3.2). Для такой схемы входной контур проходит через переход база-эмиттер и в нем возникает ток базы

$$I_{\mathcal{B}} = I_{\mathcal{E}} - I_K \approx (1 - \alpha)I_K - \alpha I_{K0} \ll I_{\mathcal{E}} \approx I_K$$

Малое значение тока базы во входном контуре и обусловило широкое применение схемы с общим эмиттером.

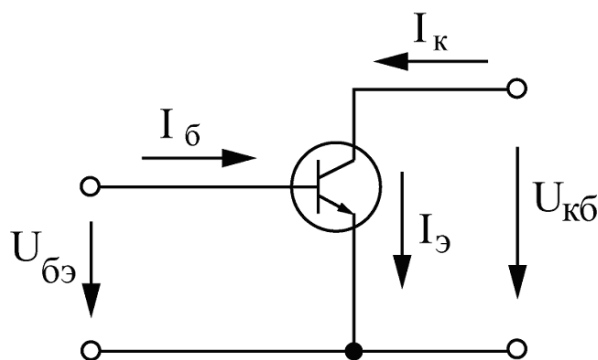


Рис. 3.3 Включение транзистора типа п-р-п по схеме с общим эмиттером

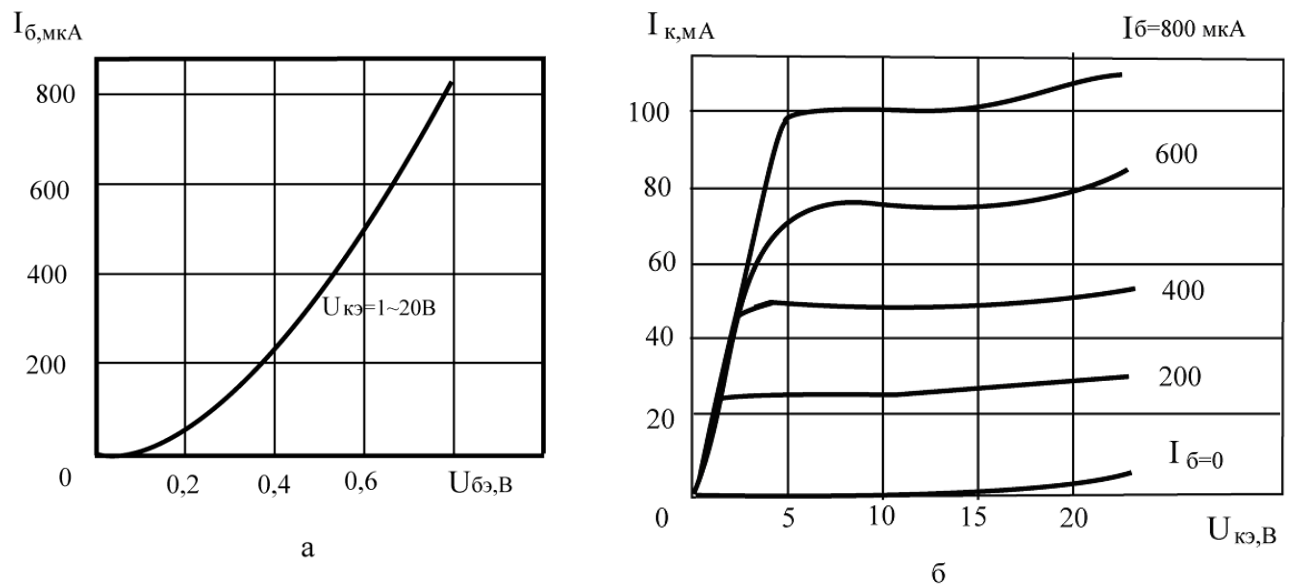


Рис. 3.4. Входная (а) и выходные (б) вольт-амперные характеристики биполярного транзистора

Для анализа работы транзистора и для расчетов схем при больших сигналах часто используют вольт-амперную характеристику (ВАХ) транзистора. На рис. 3.4 показаны типовые ВАХ маломощного биполярного транзистора по схеме включения с ОЭ. Зависимость между током и напряжением во входной цепи транзистора $I_B=f_1(U_{BE})$ называют входной или базовой характеристикой транзистора (рис. 3.4,а). Зависимость тока коллектора от напряжения между коллектором и эмиттером при фиксированных значениях тока базы $I_C=f_2(U_{CE})|_{I_B=\text{const}}$ называют семейством выходных (коллекторных) ВАХ транзистора (рис. 3.4,б). Входная характеристика практически не зависит от напряжения U_{CE} , а выходные приблизительно равноудалены друг от друга и почти прямолинейны в широком диапазоне изменения напряжения U_{CE} . Для аналитических расчетов устройств с биполярными транзисторами используют h -параметры транзисторов.

$$h_{11} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \text{ при } U_{CE} = \text{const} (\Delta U_{CE} = 0)$$

$$h_{12} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{CE}} \text{ при } I_B = \text{const} (\Delta I_B = 0)$$

$$h_{21} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \text{ при } U_{CE} = \text{const} (\Delta U_{CE} = 0)$$

$$h_{22} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}} \text{ при } I_B = \text{const} (\Delta I_B = 0)$$

Параметры h могут быть легко определены по входной и выходным характеристикам транзистора с учетом приведенных выше зависимостей.

Параметр h_{11} имеет размерность сопротивления, он представляет **собой входное сопротивление** биполярного транзистора. Параметр h_{12} – безразмерный коэффициент внутренней обратной связи по напряжению. Его значения лежат в пределах $0,002 - 0,0002$ и в большинстве случаев им можно пренебречь, т.е. полагать равным нулю. Параметр h_{21} – **коэффициент передачи тока**, характеризующий усилительные (по току) свойства транзистора при постоянном напряжении на коллекторе. Параметр h_{22} имеет размерность проводимости и характеризует **выходную проводимость** транзистора при постоянном токе базы.

Характеристики транзистора сильно зависят от температуры. С повышением температуры резко возрастает начальный коллекторный ток I_{K0} вследствие значительного увеличения количества неосновных носителей заряда в коллекторе и базе. В то же время несколько увеличивается и коэффициент h_{21} из-за увеличения подвижности носителей заряда. h -параметры транзистора, особенно коэффициент передачи тока h_{21} , зависят от частоты переменного напряжения, при котором производят измерения приращений токов и напряжений ΔI_B , ΔI_K , $\Delta U_{БЭ}$, $\Delta U_{КЭ}$, так как на высоких частотах начинает сказываться конечное время, за которое носители заряда (в транзисторе типа $n-p-n$ это электроны) проходят расстояние от эмиттера до коллектора транзистора.

Частоту, на которой коэффициент передачи тока h_{21} уменьшается до единицы, называют **граничной частотой** коэффициента передачи тока $f_{гр}$. На практике часто используют частоту f_0 , на которой параметр h_{21} уменьшается в $\sqrt{2}$ раза.

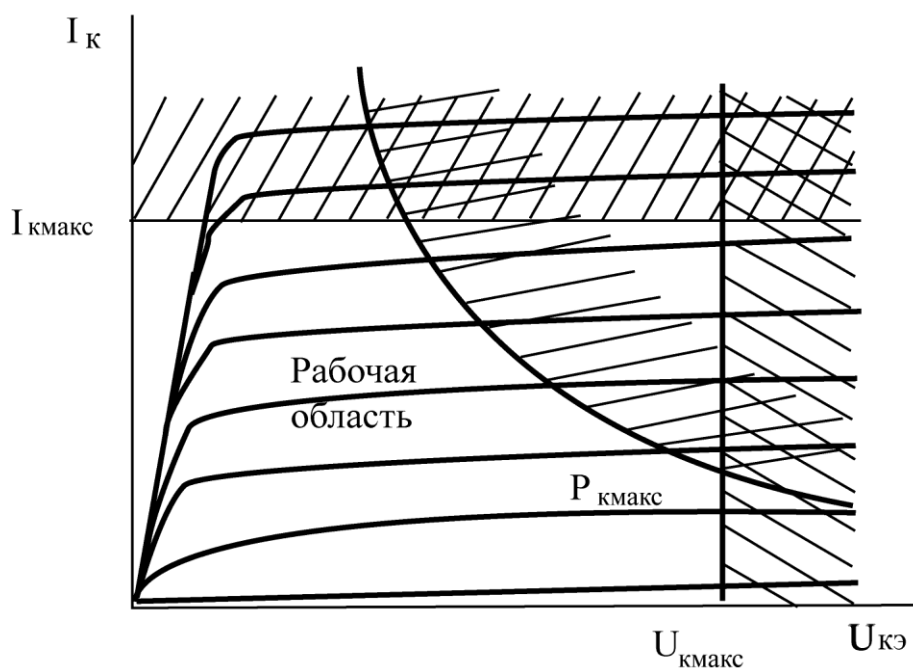


Рис. 3.5. Рабочая область выходных ВАХ биполярного транзистора

Для предотвращения перегрева коллекторного р-п-перехода необходимо, чтобы его мощность не превышала некоторого максимального значения:

$$P_K = I_K U_{KЭ} \leq P_{K \text{ макс.}}$$

Таким образом, ограничивающей кривой на коллекторных характеристиках является зависимость $I_K = P_{K \text{ макс.}} / U_{KЭ}$.

В целях увеличения допустимой мощности коллектора $P_{K \text{ макс}}$ в мощных транзисторах коллектор для улучшения теплоотвода соединяют с металлическим корпусом транзистора, а сам транзистор монтируют на специальном радиаторе.

Ограничение по допустимой мощности коллектора не является единственным. Если между коллектором и эмиттером приложено слишком высокое напряжение, то может произойти электрический пробой коллекторного р-п-перехода, поэтому необходимо, чтобы при работе транзистора коллекторное напряжение было меньше допустимого:

$$U_{KЭ} \leq U_{KЭ \text{ макс.}}$$

Существует аналогичное ограничение и по коллекторному току

$$I_K \leq I_{K \text{ макс.}}$$

которое обусловлено допустимым нагревом эмиттерного перехода.

Область, выделенная этими тремя ограничивающими линиями (рис. 1.14), является **рабочей областью характеристик** транзистора.

Из емкости р-п-переходов существенное значение имеет только емкость коллекторного перехода $C_{КБ}$.

Входное сопротивление биполярных транзисторов составляет (10÷100) Ом, выходное (1÷10) кОм.

Диапазоны значений остальных параметров отечественных биполярных транзисторов приведены в табл. 1.2.

Таблица 3.1. Значение параметров биполярных транзисторов.

Тип транзистора	$U_{KЭ \text{ макс.}}$, В	$P_{K \text{ макс.}}$, Вт	$I_{K \text{ макс.}}$, А	$f_{ГР}$, МГц	$S_{КБ}$, пФ	h_{21}
Маломощный	10-80	0,01-0,3	0,01-0,4	1,0-8000	1-10	20-1000
Средней мощности	12-500	0,3-3,0	≤ 10	1,0-100	5-100	20-600
Большой мощности	20-1500	3,0-100	≤ 50	0,2-10	10-1000	20-200